第 37 卷第 13 期
2017 年 7 月

生　态　学　报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.13
Jul.,2017

DOI: 10.5846/stxb201601020007
彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序.基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区.生态学报,2017,37(13):4562-4572.
Peng J, Yang Y, Xie P, Liu Y X.Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services.Acta Ecologica Sinica,2017,37(13):4562-4572.

基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区

彭　建[1,2,*],杨　旸[2],谢　盼[1],刘焱序[1]
1 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京　100871
2 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳　518055

摘要:绿地生态网络是城市地域生态持续性的重要保障,分区管控则是实现省域绿地生态网络差异化建设目标的基本原则。考虑到生态系统服务的供给和需求能够有效表征绿地生态网络建设的生态本底与生态需求,以县域为研究单元,采用修正的生态系统服务价值量核算生态系统服务供给量,以土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP 表征生态系统服务需求量,基于供需分析提出广东省绿地生态网络建设分区方案。研究结果表明,按照各区县生态本底和生态需求差异分为四大类型区:Ⅰ城市生态节点保育型,包含 13 个区县,包含潮州市湘桥区、汕头市金平区、佛山市顺德区、广州市南沙区、黄埔区、荔湾区、越秀区、海珠区、深圳市盐田区、罗湖区、南山区、肇庆市端州区、珠海市金湾区等,为生态本底好-生态需求高的区域,在建设中应重点关注城市大型绿地游憩、科教等社会-生态复合功能;Ⅱ城市生境斑块修复型,包含 34 个区县,主要分布在珠三角核心区及粤东沿海地区,为生态本底差-生态需求高的区域,在建设中需要加大资金投入、完善城市绿色基础设施;Ⅲ为城郊潜在节点重构型,包含 21 个区县,主要分布在珠三角的江门、惠州、粤西沿海区域以及粤东中部,为生态本底差-生态需求低的区域,应以生态经济为导向,在产业空间重构的基础上,以城市反哺乡村,推进区域生态空间优化;Ⅳ城郊源地网络连通型,包含 55 个区县,主要分布在广东省北部地区,为生态本底好-生态需求低地区,应强化生态源地的保护,保障生态系统服务流向周边区域的持续输送。分区方案基本表征了广东省县域生态本底和生态需求的空间差异,能够为绿地生态网络建设提供规划指引。

关键词:生态系统服务;绿地生态网络;分区管控;象限图;广东省

Zoning for the construction of green space ecological networks in Guangdong Province based on the supply and demand of ecosystem services

PENG Jian[1,2,*], YANG Yang[2], XIE Pan[1], LIU Yanxu[1]
1 *Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing* 100871, *China*
2 *Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen* 518055, *China*

Abstract: Green space ecological networks are essential for urban ecological sustainability, and it is necessary to adapt to local conditions when constructing such green space ecological networks. Supply and demand for ecosystem services can effectively characterize the level of ecological supply and demand for the establishment of green space ecological networks. This research provides a scheme for zoning Guangdong Province based on a supply and demand analysis at a county scale. The supply of ecosystem services was calculated by modified values of ecosystem services, whereas the demand of ecosystem services was represented by land use intensity, population density, and GDP per area. The results show that all the counties

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271195)
收稿日期:2016-01-02;　　**网络出版日期**:2017-02-23

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jianpeng@ urban.pku.edu.cn

could be sorted into four types. The first type is an urban ecological conservation node, which contains 13 counties with good ecological supply and high ecological demand. Urban construction should focus on the integrated functions of large green spaces, such as recreation, science, and education. The second type is an urban habitat patch repair node, which contains 34 counties with poor ecological supply and high ecological demand. Urban construction should increase capital investment to perfect green infrastructure. The third type is a suburban potential remodeling node, containing 21 counties with poor ecological supply and low ecological demand. Urban construction should be eco-oriented. Based on industrial reconstruction, it is possible to optimize regional ecological space through rural urban financing. The fourth type is a suburban source network connectivity node, including 55 counties with good ecological supply and low ecological demand. This type should strengthen ecological source protection and guarantee continued delivery of ecosystem services to the surrounding areas. This zoning scheme could generally characterize spatial differences of ecological supply and demand, and aims to provide ecological network planning guidelines for green space construction.

Key Words: ecosystem services; green space ecological networks; zoning management; quadrantal diagram; Guangdong Province

绿地生态网络是指稳定的以自然植被为主且依照特定规律而连接的生态空间[1],主要由耕地、林地、草地、水体等构成[2-3]。在城市化进程中,城市建设占用生态用地,城市绿地结构容易出现较高的斑块破碎化,难以形成绿地廊道网络结构[4]。这种破碎结构不利于生态过程的形成和维持,对城市生态系统服务的效用发挥构成显著影响。绿地生态网络建设通过线性廊道将各种类型的点状、面状生态斑块组合成一个空间化绿地网络,从而形成一个自然、多样、高效并具有较强自我调节能力的完整生态空间,有助于提升促进生物多样性、温度调节、净化空气、涵养水源、保持土壤、美学鉴赏、提供产品等生态功能[5-6],以及不同地域生态系统服务的空间流动。因此,绿地生态网络的建设对有效改善城市生态环境质量,实现城市生态系统的良性循环,协调城市发展与环境保护的关系具有重要意义[7]。

绿地生态网络研究的尺度一般包括“区域-局地-场所”,其中市域范围内的网络构建一直是研究热点。经过多年实践,国外绿地生态网络构建形成了较为成熟的规划模式和操作流程,即基于区域土地覆被、生境评价、野生动物保护等目标将廊道视作绿地生态网络骨架进行整体规划,通过适宜性评价、连接度评价、可达性评价等选取生态节点,从而识别生态廊道进而形成多种生态网络方案,并对比判定最优方案[8-11]。相较而言,中国系统性的生态网络规划起步较晚,目前大都处于关注廊道连接的初期阶段,但也进行着相似的规划活动以推动城市绿地合理构建[12-13]。随着欧美绿地生态网络规划思想在国内的传播,其在市域规划实践中被进一步认可运用。选取生态源地、采用最小耗费阻力模型识别潜在廊道、定量分析并优化生态网络已成为我国生态空间规划的基本范式,只是不同学者对于源地选取、阻力设定、网络构建的方法视角略有不同,如从景观连通性[14]、生物多样性[15]等角度选取生态功能节点,采用熵权法综合评价不同景观类型结构和功能对生态流的影响[15],基于最小耗费距离模型识别潜在廊道[15-16],应用重力模型、网络结构[15]、图论分析[17]定量解析生态网络结构、探讨优先恢复途径等[14-19]。此外,也有学者从人文视角,即考虑生态网络、外部社会经济要素,叠加景观网络、游憩网络构建多目标、多层次的复合型生态网络[20],而一些省域、城镇群尺度的生态网络构建更拓宽了绿地生态网络的规划尺度[21]。

然而,面对多功能目标、多层次的综合性绿地生态网络构建需求,目前的绿地生态网络构建仍侧重于土地利用方式等自然生境特征,即强调生态系统服务的供给视角;而生态建设本质上仍是为可持续的城市化服务,但城市化进程中公众对于自然生态系统服务的需求,往往未能得到有效计量。这一结果造成了一些快速城市化地区由于自然生境斑块少,规划绿地网络结构较为简单、生态效用有限等问题,并未有效达成城市发展与环境保护相协调的规划目标。生态系统服务是指生态系统与生态过程所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用,包括对人类生存及生活质量有贡献的有形产品和无形服务[22-23]。这一理论内涵决定了生态

系统服务可以成为衔接城市居民生活福祉和生境斑块自然生态过程的核心概念。生态系统服务的供给量取决于生态系统自身状况,而对于生态系统服务的需求则取决于社会经济发展水平[24]。相关研究表明,生态系统服务供需存在明显的空间异质性及空间错位问题[25-27],因此,通过测算区域生态系统服务供给和需求,分析供需的空间特征及平衡状况,可以为绿地生态网络差异化建设提供定量依据。

处于快速城市化阶段的广东省,长期面临着人口经济与资源环境难以有效协调的压力,作为我国生态建设的先行者,2011 年提出了《广东省绿道网建设总体规划》,拟形成由 10 条省立绿道、约 17100km^2 绿化缓冲区和 46 处城际交界面共同组成的省域绿道网总体格局。但是,在广东省绿道建设效用逐步发挥的同时,由于建设区域的地理环境、开发强度、人口密度、经济实力、发展方向差异造成生态需求与生态本底空间上不匹配的问题益发值得关注。因此,本研究采用修正的生态系统服务价值量,以及土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP 分别核算生态系统服务供给量、需求量,基于供需分析提出广东省绿地生态网络建设分区方案,以期通过分区指导绿地生态网络的差异化建设,为下一步开展广东省绿地生态网络建设提供决策指引。

1 研究区概况

广东省地处中国大陆南部,北依南岭山脉、东北为武夷山脉,西接云开大山山脉,南临南海,位于 109°45′—117°20′E、20°12′—25°31′N 之间。广东省属于东亚季风区,从北向南分别为中亚热带、南亚热带和热带气候,年平均降水量在 1300—2500 毫米之间,在空间分布基本上呈南高北低的趋势。全境地势北高东低,丘陵地带主要分布在粤东的梅县、五华,粤北的南雄、仁化,粤西的罗定;而台地主要分布在粤西的湛江、茂名,粤东的海陆丰、惠来南部和粤中一部分地区;平原主要分布在粤中与沿海地区如珠江三角洲和潮汕平原。气候、地形的空间分异决定了广东省各地区生态本底的不同。

截至 2012 年底,广东省下辖 21 个地级市,具体包括 23 个县级市、39 个县、3 个自治县、56 个市辖区,以及中山、东莞两地级市(无下辖区县),共计 123 个研究单元。广东省按照地理区位和经济发展状况可以分为珠三角、粤东、粤西、粤北四个经济区域,分区之间差异巨大(图 1)。其中,珠三角是中国人口密度最高的地区之一,也是中国南方的经济和金融中心,所辖深圳、广州为发达的大城市;粤东、粤西、粤北的城市化进程相对较缓,特别是粤北地区大部分为山地,经济发展较落后于其他 3 个区域。不同的经济发展状况、人口密度决定了各地区生态需求的显著差异。

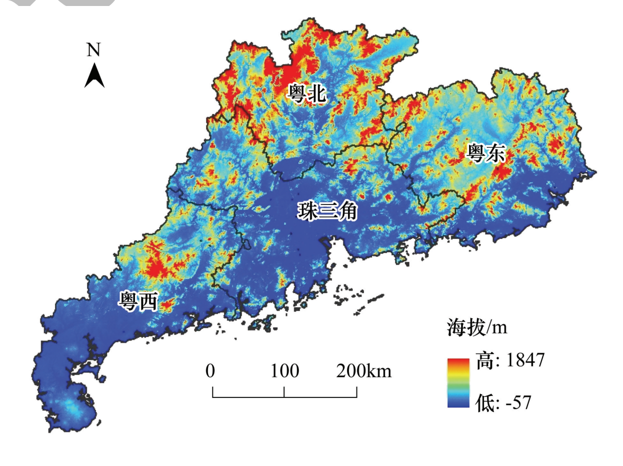


图 1 研究区地理位置

Fig.1 Location of study area

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究采用的土地利用数据是由国家基础地理信息中心发布的全球 30 米地表覆盖产品(Globe Land 30—2010)。人口、经济和社会等数据来自《广东省统计年鉴》(2012)、《中国统计年鉴》(2012)。在数据预处理中,将土地利用类型进行合并,分为耕地、林地、草地、水体和建设用地等 5 类,并归并为生态用地与建设用地两个一级分类[28]。其中,建设用地是指人工硬化地表,包括居民点、交通用地和工矿用地在内的建设用地,但居住用地中的绿地不包括在内;生态用地是指维持城市生态系统结构与功能的用地类型,为城市人类活动提供重要的生态系统服务,主要包含耕地、林地、草地和水体。具体而言,耕地指种植农作物的土地,包括水田、旱地等;林地主要指生长乔木、灌木等林业用地;草地指牧草地,包括天然草地、改良草地和人工草地;水体指天然形成或人工的河湖用地,包括河流、湖泊等。

2.2 生态系统服务供给核算

生态系统服务的供给指在特定时间段特定区域所能提供生态系统产品和服务的能力[29]。生态系统服务供给有明显的空间异质性,所以其服务供给能力也具有显著空间分异特征[30]。根据“千年生态系统评估”中生态系统服务所对应的供给服务、调节服务、文化服务和支持服务类型划分,本研究按谢高地等的划分方法提取主要的 9 种服务类型。其中,供给服务包含食物产品供给和原材料生产 2 种服务;调节服务包含气体调节、气候调节、水源涵养、废物处理 4 种服务;文化服务主要是指提供美学价值服务;支持服务包含保持土壤和维持生物多样性 2 种服务。

考虑到采用全国参数表征区域特征的误差,有必要对中国单位面积生态系统服务价值当量表中的当量系数进行修正[31]。供给服务包含的食物产品供给和原材料生产服务,可以通过统计年鉴中的农、林、牧、渔产值量化;调节服务和支持服务差异来源于自然本底,本文用森林覆盖率表征自然本底;文化服务可以从旅游角度间接量化提供美学的服务价值。因而,本研究采用单位土地面积产值中的农、林、牧、渔产值当量分别修正耕地、林地、草地、水体的供给服务当量,用森林覆盖率对调节服务和支持服务的价值当量进行修正,基于旅游总收入指标修正文化服务的价值当量。具体修正系数计算公式如下:

$$\eta = \frac{a_i}{A_i} \tag{1}$$

式中, n 为修正系数,无量纲;a_i为广东省平均值; A_i为中国平均值。根据计算结果,对耕地、林地、草地、水体的生态系统供给服务修正系数分别为 2.60、3.57、2.38、5.95;对调节、支持、文化服务的修正系数分别为 2.43、2.43、11.50。将中国单位面积生态系统服务当量的经济价值乘以修正系数,可以得到广东省生态系统服务价值量(表 1)。由于建设用地提供生态系统服务很少[22,31],在此不予估算。

表 1　广东省单位面积生态系统服务价值

Table 1　Ecosystem service value per unit area in Guangdong Province

一级类型 First class	二级类型 Second class	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水体 Water body
供给服务/(元 hm^{-2} a^{-1})	食物生产	1167.7	533.5	463.5	1404.3
Provisioning services	原材料生产	455.4	4818.0	388.0	927.4
	小计	1623.1	5351.5	851.5	2331.7
调节服务/(元 hm^{-2} a^{-1})	气体调节	785.7	4714.5	1637.0	556.6
Regulating services	气候调节	1058.6	4441.7	1702.5	2248.1
	水源涵养	840.3	4463.5	1658.8	20484.0
	废物处理	1516.9	1877.1	1440.5	16206.0
	小计	4201.5	15496.8	6438.8	39494.7
支持服务/(元 hm^{-2} a^{-1})	保持土壤	1604.2	4387.1	2444.5	447.4
Supporting services	维持生物多样性	1113.1	4921.8	2040.8	3743.2
	小计	2717.3	9308.9	4485.3	4190.6
文化服务/(元 hm^{-2} a^{-1})	提供美学景观	878.0	10742.5	4493.3	22931.0
Cultural services	小计	878.0	10742.5	4493.3	22931.0
	合计	9419.9	40899.7	16268.9	68948.0

根据广东省各地类单位面积生态系统服务价值,计算区县生态系统服务总价值量。考虑到各区县土地总面积的差异,为横向比较各区县土地系统提供的生态系统服务供给差异,利用单位面积生态系统服务价值反映各区县生态系统服务供给能力。

$$\mathrm{ESV} = \sum_{i=1}^{n} VC_i \times \frac{U_i}{U} \tag{2}$$

式中,ESV 为评价单元地均生态系统服务价值量,VC_i为第 i 类用地类型的单位面积生态系统服务总价值,n 为

土地利用类型数量，U_i为第 i 类用地类型的土地面积，U 为土地总面积。

2.3 生态系统服务需求核算

目前，各国学者对于生态系统服务需求的理解主要分为三种：（1）Burkhard 等认为生态系统服务需求是指一定时间一定范围内人类所消耗或使用的生态系统产品和服务总和[25]；（2）Schröte 等则认为生态系统服务需求是人类个体对特定属性生态系统服务偏好的表达，如生物物理特性，可用的位置和时间以及关联机会成本[32]，也就是说，生态系统服务需求表达了人类对享受生态系统服务的偏好，可能超过当前人类消耗或使用的产品和服务；（3）Villamagna 等更深入地综合考虑人类基本生活对生态系统服务的消耗和偏好需求，认为生态系统服务需求是指被人类社会消耗（能够获得的）或者希望获得的生态系统服务的数量[33]。

本研究采纳对生态系统服务需求的第 3 种理解，即生态系统服务需求既包括能够获得的（已消耗的）产品或服务，也包括希望获得的产品或服务。考虑生态系统服务变化驱动因子以及数据可获取性，选取社会经济指标中的土地利用开发程度、人口密度、地均 GDP 三个指标表达生态系统服务需求。其中，土地利用开发程度即建设用地面积占区域土地总面积的百分比，反映人类对生态系统服务的消耗强度，建设用地面积比例越大，土地开发利用程度越大，人类对生态系统服务消耗越高；人口密度可以反映对生态系统服务需求的数量，人口密度越大，则对服务的总需求越大；地均 GDP 反映地区的富裕程度，可以间接反映人类对享受生态系统服务的偏好水平，地区经济实力越强，期望获得的生态系统服务越高。而由于少量极发达地区在人口密度以及地均 GDP 带来的明显差异，使得两个指标极大波动，因而借助统计学中取对数的方法，在不影响整体分布趋势的前提下，将局部剧烈波动特征弱化后代入计算，以便于后续分析。

$$\mathrm{X} = x_{i1}^{*} \times \lg(x_{i2}^{*}) \times \lg(x_{i3}^{*}) \tag{3}$$

式中，X 代表评价单元生态系统服务需求，X_{i1}^{*}、X_{i2}^{*}、X_{i3}^{*} 分别代表土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP。

2.4 生态系统服务供需象限划分

基于上述生态系统服务供给、需求核算方法，对所求得的生态系统服务需求量、供给量进行 z-score 标准化，以标准化的生态系统服务供给量、需求量分别表征 x 轴生态本底、y 轴生态需求，划分出 4 个象限；象限Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ依次代表生态本底好-生态需求高、生态本底差-生态需求高、生态本底差-生态需求低、生态本底好-生态需求低等不同类型的绿地生态网络建设分区。

生态系统服务需求量、供给量的 z-score 标准化方法为：

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \tag{4}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{5}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} (x - \bar{x})^2} \tag{6}$$

式中，X 为评价单元标准化后的生态系统服务供给量、需求量，X_i为第 i 个评价单元的生态系统服务供给量、需求量，$\bar{x}$ 为 全省平均值，s 为全省标准差，n 为评价单元的总数。

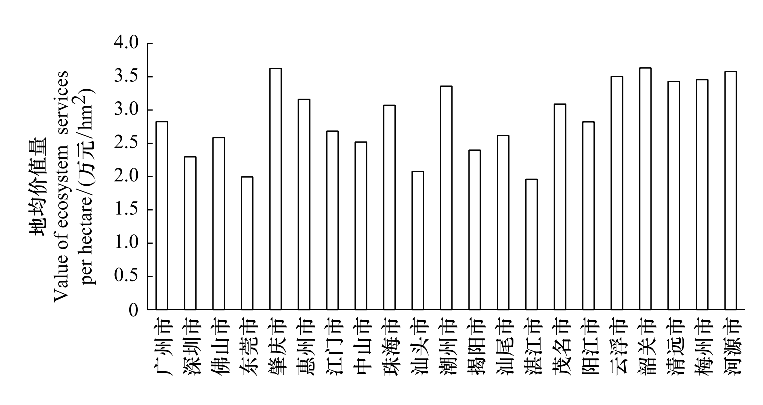
3 结果分析

3.1 生态系统服务供给空间分异

由于广东省各市生态用地和建设用地分布比例差异较大，这直接导致了省域内生态系统服务价值分布的高度异质性。从四大经济区域来看，珠三角地区生态用地所占百分比最低，其次为粤东地区和粤西地区，粤北地区生态用地所占百分比最高。同时，广东省各类土地利用类型面积比例差异较大，其中面积百分比最大的为林地，占总面积的 60.21%，以下依次为农田（14.87%）、建设用地（14.64%）、水体（6.77%）和草地（3.51%）。

由图 2 可知，广东省各地级市中，地均生态系统服务供给价值量最高的是粤北的韶关、珠三角的肇庆，地

均价值量达到 3.63 万元/hm²;而地均生态系统服务供给价值量较低的区域,分布在珠三角的东莞(2.00 万元/hm²)、深圳(2.30 万元/hm²),以及粤西的湛江(1.96 万元/hm²)和粤东的汕头(2.08 万元/hm²)、揭阳(2.40 万元/hm²)。从四大经济区域平均水平来看,粤北的地均价值量最高达 3.52 万元/hm²,其次为粤西2.84万元/hm²,珠三角 2.75 万元/hm²,粤东最低仅为 2.61 万元/hm²。如图 2 所示,4 种服务类型所占百分比依次为调节服务(38.4%)、文化服务(25.4%)、支持服务(23.5%)、供给服务(12.7%)。其中,调节服务中以气体调节服务所占比例最大,其次为气候调节、水源涵养和废物处理服务。



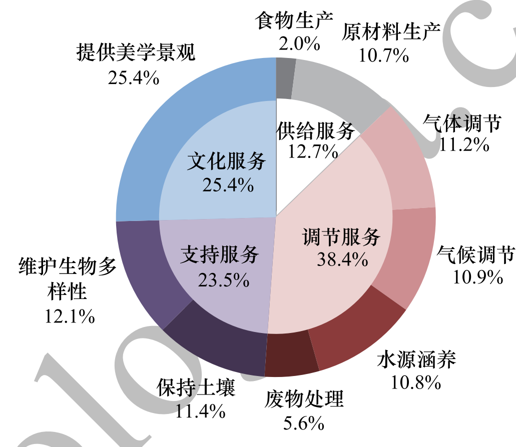


图 2　广东省分地级市生态系统服务供给及不同类型生态系统服务价值量百分比

Fig.2　Ecosystem service supply in each city of Guangdong Province and value ratio of each kind of ecosystem services

根据各区县生态系统服务供给价值分布可知(图 3),广东省北部山区生态系统服务供给价值高于南部平原,高值区集中在北部七星岩、罗壳山、青云山脉及莲花山脉,其生态系统服务价值都超过 33627 元/hm²;生态系统服务供给的低值主要出现在粤西雷州半岛和粤东沿海地区,不足 18038 元/hm²。广东省生态系统服务供给价值高低分布与各区县土地利用类型组成密切相关,生态系统服务供给价值最高值在粤北韶关新丰县,达到 38684 元/hm²,该县林地占区域土地总面积的 80%;最低值出现在茂名市茂港区,仅为 11349 元/hm²,当地的林地面积比例不足 4%。

3.2　生态系统服务需求空间分异

由于省内自然地理条件与经济发展差异,广东省人口密度空间分异显著(图 4)。其中,广州市的荔湾区、海珠区、越秀区、天河区和深圳市的福田区、罗湖区,人口密度均超过了 10000 人/km²,而部分山地、丘陵县域人口密度不足 500 人/km²。虽然广东省地均 GDP 水平远高于全国平均水平,但省内的经济发展水平差异仍然较大(图 4);地均 GDP 最高值出现在珠三角广州市越秀区,达到 286187 万元/km²,最低值在粤北河源市东源县,仅为 148 万元/ km²,两者相差近 2000 倍。而人口聚集、经济发展的空间格局映射在土地空间上,则体现为省域土地开发利用程度的南北分异(图 4)。全省土地开发利用程度整体较高,尤其是湛江市霞山区、汕头市龙湖区、深圳市宝安区,佛山市禅城区和南海区的土地开发利用程度均大于 50%;但粤北地区和粤西地区土地开发利用程度大多较低,不足 20%。

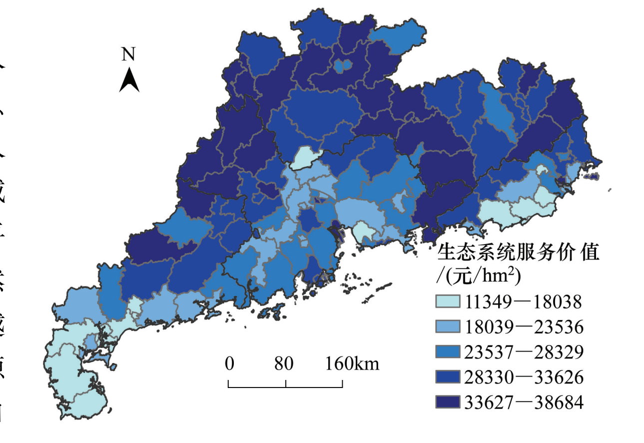


图 3　广东省分区县生态系统服务供给

Fig.3　Ecosystem services supply at county level in Guangdong Province

将未标准化的广东省各区县生态系统服务需求按自然断点法分为 5 个等级(图 4),可以发现,生态系统

服务需求高值主要集中在珠三角核心区,呈环状向周围递减。其中,佛山市禅城区需求量最高,广州市(海珠区、越秀区、天河区、白云区、荔湾区、黄埔区)、深圳市(宝安区、南山区、龙岗区),以及珠三角东西两翼的汕头市(龙湖区)和湛江市(霞山区)也都是生态系统服务需求高值分布区域,而粤西、粤北大部分区域的生态系统服务需求普遍低于1。对比三项指标与需求分布图,尽管各区县生态系统服务需求高低值分布由人口密度、土地开发利用程度和地均 GDP 三者共同决定,但需求分布格局与人口密度分布最为接近。

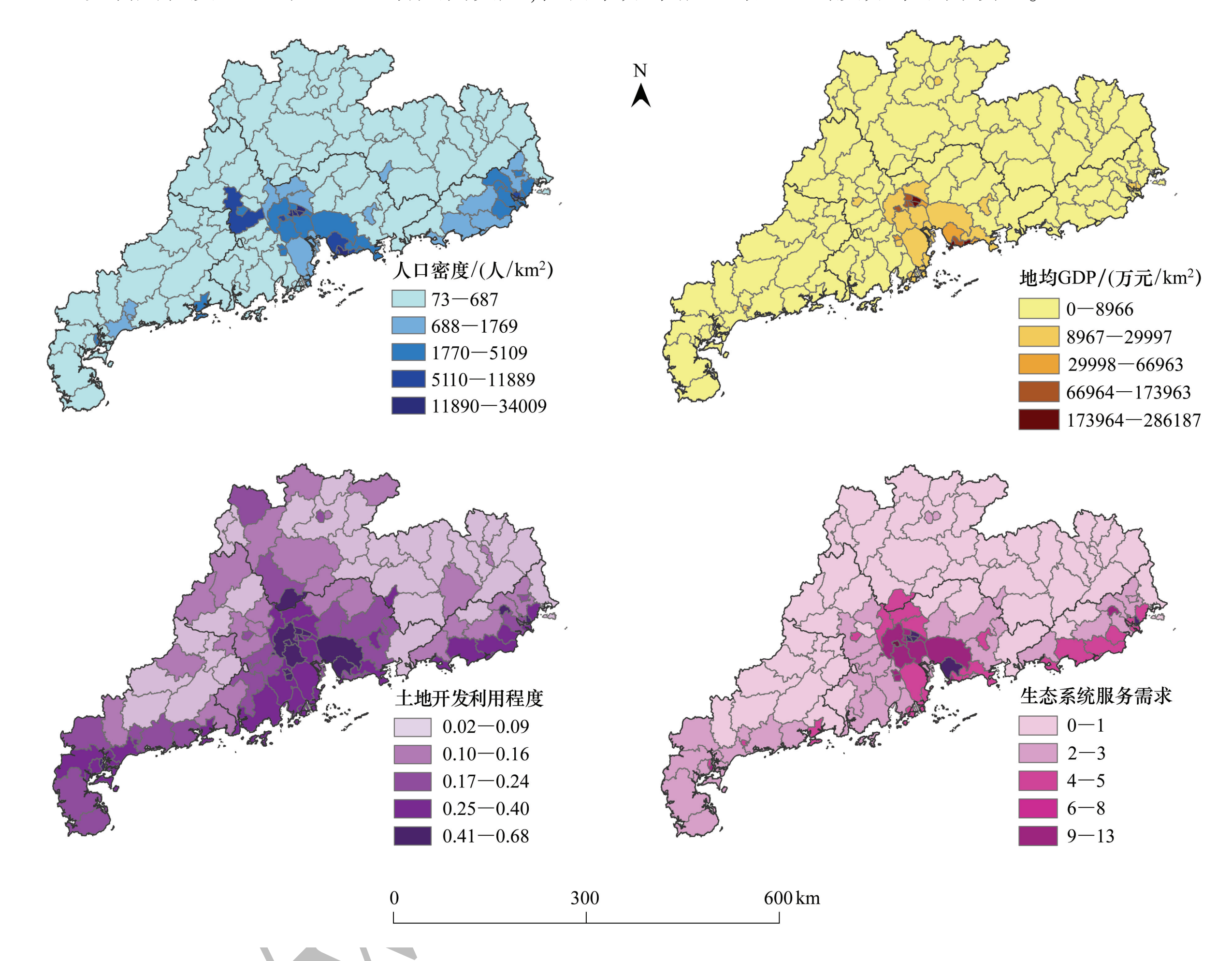


图4 广东省分区县生态系统服务需求空间分异:人口密度;地均 GDP;土地开发利用程度;生态系统服务需求

Fig.4 Spatial distribution of population density, GDP per area, land use development degree, and ecosystem service demand at county level in Guangdong Province

3.3 绿地生态网络建设分区

基于生态系统服务供给、需求的象限图分析结果表明(图5),广东省生态本底好-生态需求高、生态本底差-生态需求低这两类组合关系的区县相对偏少,大部分区县都落在生态本底差-生态需求高、生态本底好-生态需求低区间内。在四大经济区中,粤北大部分地区属于生态需求低-生态本底好的地区,除了河源市源城区、清远市清城区在Ⅱ象限。粤东地区基本分为两类,其中生态需求高-生态本底差区域主要包括揭阳市(惠来县、榕城区)、汕头市(濠江区、澄海区、潮南区、龙湖区)、汕尾市(城区、陆丰区);生态需求低-生态本底好的地区则主要分布在潮州市(饶平县、潮安县)、揭阳市揭西县、汕头市南澳县、汕尾市(陆河县、海丰县)。粤西大部分区县生态需求都较低,但自然本底有所差异,仅有少部分地区如茂名市(茂南区、茂港区)、阳江市江城区、湛江市(吴川市、赤坎区、霞山区)生态需求较高。在珠三角地区,超过半数区域自然生态系统本底条件不能匹配其生态需求,尤以佛山市禅城区、广州市天河区为代表;而生态本底尚可但生态需求低的地区,主要分布在肇庆市(广宁县、德庆县、封开县)和惠州市(惠东县、龙门县)。

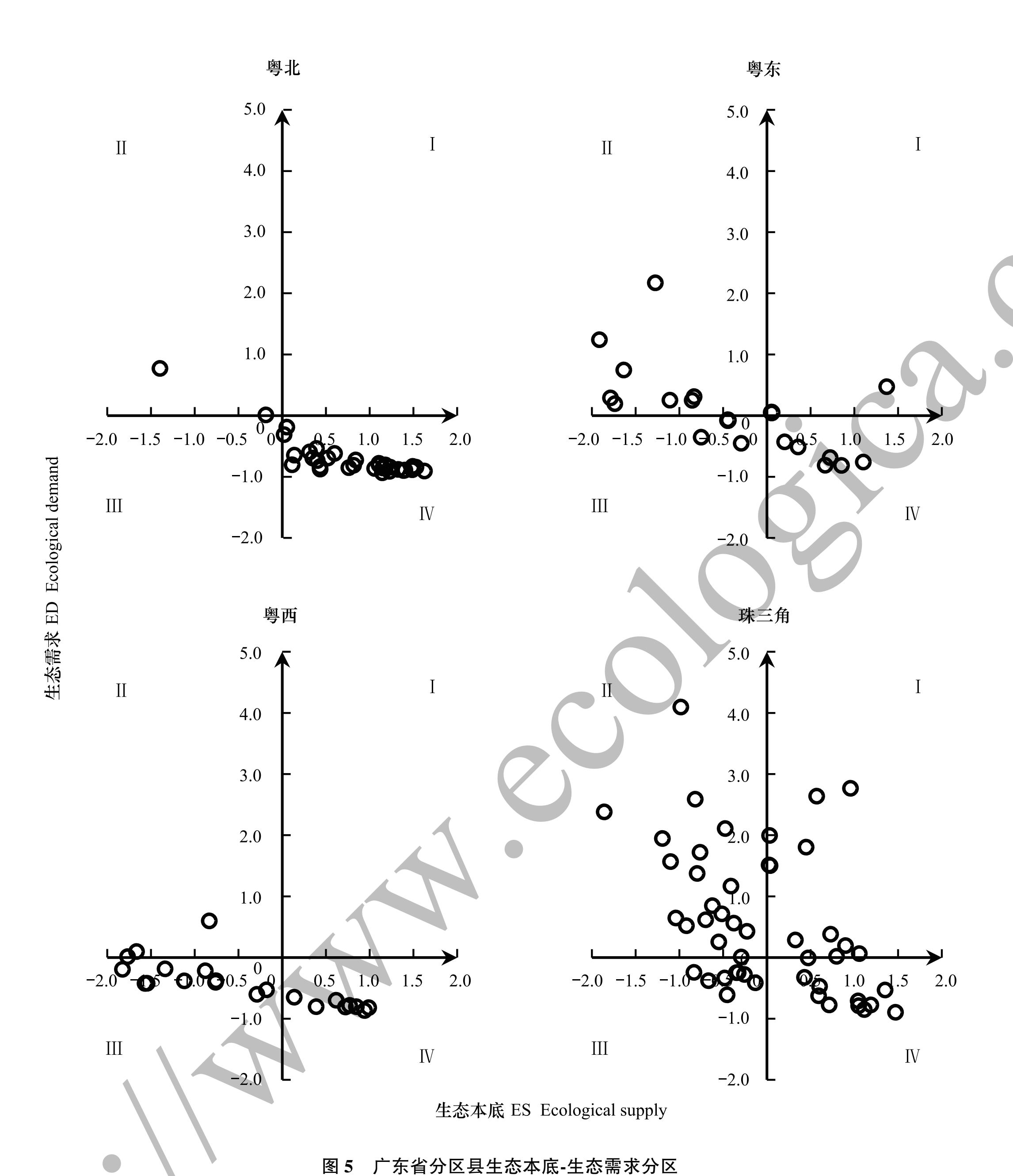


图 5　广东省分区县生态本底-生态需求分区

Fig.5　Ecological supply (ES) and ecological demand (ED) at county level in Guangdong Province in (a. Northern Guangdong, b. Eastern Guangdong, c. Western Guangdong, d. Pearl River Delta)

基于象限分布,按照广东省生态本底和生态需求差异,可以将全省 123 个区县划分为四大绿地生态网络建设类型区(图 6,表 2):

Ⅰ城市生态节点保育型(高生态本底-高生态需求)　包含 13 个区县,主要分布在珠三角。这些区县社会经济发展水平中等偏上,具备一定的林草地覆盖,生态本底好,基本能够满足生态需求。因此,对现有城市生态用地的保护型规划可以发挥绿地的生态节点作用,成为其他区域生态系统服务流动的战略节点。该区域在绿地生态网络的建设中应发挥区域良好的经济与生态优势,重视城市大型绿地的保护,突出绿地网络在游憩、科教、城市形象等方面的社会-生态复合功能。

表 2 广东省分区县绿地生态网络建设分区

Table 2 Zoning for ecological networks construction of green space at county level in Guangdong Province

分区类型 Zoning types	区县数 Numbers	区县名称 Name of counties
Ⅰ城市生态节点保育型 (高生态本底-高生态需求) Ⅰ Urban ecological conservation node (high ES and high ED)	13	粤东(潮州市湘桥区、汕头市金平区) 珠三角(佛山市顺德区;广州市南沙区、黄埔区、荔湾区、越秀区、海珠区;深圳市盐田区、罗湖区、南山区;肇庆市端州区;珠海市金湾区)
Ⅱ城市生境斑块修复型 (低生态本底-高生态需求) Ⅱ Urban habitat patch repair node (low ES and high ED)	34	粤北(河源市源城区、清远市清城区)、粤东(揭阳市惠来县、榕城区;汕头市濠江区、澄海区、潮南区、龙湖区;汕尾市城区、陆丰区) 粤西(茂名市茂南区、茂港区;阳江市江城区;湛江市吴川市、赤坎区、霞山区) 珠三角(东莞市;佛山市三水区、南海区、禅城区;广州市花都区、萝岗区、番禺区、白云区、天河区;惠州市惠城区;江门市新会区、江海区、蓬江区;深圳市福田区、龙岗区、宝安区;中山市;珠海市香洲区)
Ⅲ城郊潜在节点重构型 (低生态本底-低生态需求) Ⅲ Suburban potential remodeling node (low ES and low ED)	21	粤东(揭阳市揭东区、普宁市;汕头市潮阳区) 粤西(茂名市化州市、电白县;阳江市阳东县、阳西县;湛江市徐闻县、雷州市、廉江市、麻章区、遂溪县、坡头区) 珠三角(佛山市高明区;广州市增城市;惠州市博罗县、惠阳区;江门市恩平市、鹤山市、台山市、开平市)
Ⅳ城郊源地网络连通型 (高生态本底-低生态需求) Ⅳ Suburban source network connectivity node (high ES and low ED)	55	粤北(河源市东源县、和平县、连平县、紫金县、龙川县;梅州市大埔县、丰顺县、蕉岭县、梅县、平远县、五华县、梅江区、兴宁市;清远市连山壮族瑶族自治区、连南瑶族自治县、阳山县、英德市、佛冈县、连州市、清新区;韶关市新丰县、仁化县、乳源瑶族自治州、始兴县、翁源县、曲江区、乐昌市、南雄市、浈江区、武江区) 粤东(潮州市饶平县、潮安县;揭阳市揭西县;汕头市南澳县;汕尾市陆河县、海丰县) 粤西(茂名市信宜市、高州市;阳江市阳春市;云浮市郁南县、新兴县、云安县、云城区、罗定市) 珠三角(广州市从化市;惠州市惠东县、龙门县;肇庆市广宁县、德庆县、封开县、怀集县、鼎湖区、四会市、高要区;珠海市斗门区)

Ⅱ城市生境斑块修复型(低生态本底-高生态需求) 包含 34 个区县,主要分布在珠三角核心区及粤东沿海地区。该区地形较平坦、人口稠密、土地开发利用强度高,现状自然生境斑块数量少、连通性差,而城市大量的人口聚集和工业发展提升了对生态用地的需求。因此,本区应以生态保护和生态建设优先,由于区域内的城市发展已有一定的初始资金积累,有必要加大资金投入完善城市绿色基础设施。而在绿地生态网络建设中,核心要务是修复已有生境斑块,提升斑块稳定性,充分利用点状空间,增加绿地覆盖率和绿量,将分散的绿地斑块串联成网络体系促进斑块间物质、能量交换。此外,绿地网络格局应当逐步优化,现有建设的绿道网络大多分布在珠三角核心区,而粤东汕尾、揭阳、汕头等沿海区域已建设的绿道网络相对稀疏,有必要适当增设绿道、提高网络连通度。

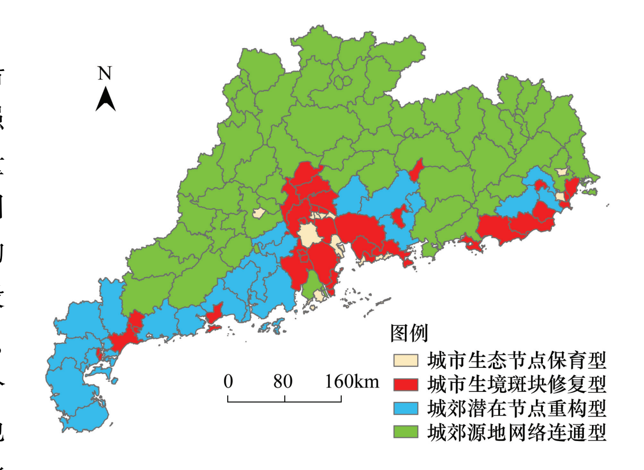


图 6 基于生态本底和生态需求的广东省绿地生态网络建设分区

Fig.6 Zoning for ecological network construction of green space based on ecological supply and demand at county level in Guangdong Province

Ⅲ城郊潜在节点重构型(低生态本底-低生态需求) 包含 21 个区县,主要分布在珠三角的江门、惠州,粤西沿海区域,以及粤东中部。该区地势平坦,土地开发强度不高,生态用地数量较低,尤其是草地和林地不足。因此,尽管该区生态需求较低,但生态用地面积较小,能够供给的生态系统服务低于全省平均水平。同时,该区经济基础相对薄弱,因而有必要以生态经济为导向,在完成产业空间重构、保障区域社会经济健康发展的前

提下,以城市反哺乡村的形式推进生态空间优化。由于本区有较多沿海区县,湿地恢复与重建、海岸带生态修复也应纳入绿地生态网络建设。

Ⅳ城郊源地网络连通型(高生态本底-低生态需求)　包含 55 个区县,主要分布在全省北部。该区地势相对较高,生态用地在数量和空间上提供的生态系统服务水平高,生态需求水平较低,生态资源富足。同时,北部山区是全省重要的生态屏障,森林覆盖率高,并位于北江和东江的上游,分布有大量的河流水系和大中型水库及其集雨区,是重要的水源保护地。因此,本区作为广东省绿地生态网络的核心,应强化对大面积生态源地的保护,保障生态系统服务流向周边区域的持续输送。

4　结语

针对有限国土空间难以满足日益增长的社会生产、生活、生态空间客观需求,有必要明晰城市化进程下不同区域的生态本底和生态需求差异,基于生态系统服务流视角强调区域生态建设的供需均衡原则。本研究以广东省为例,提出基于生态系统服务供给与需求的绿地生态网络建设分区方案,划分四大类型区:Ⅰ城市生态节点保育型,重点关注城市大型绿地游憩、科教等社会-生态复合功能;Ⅱ城市生境斑块修复型,加大资金投入完善城市绿色基础设施;Ⅲ城郊潜在节点重构型,通过产业空间重构推进生态空间优化;Ⅳ城郊源地网络连通型,强化生态源地保护,保障生态系统服务流向周边区域的持续输送。

在目前的生态系统服务研究中,生态系统服务经济价值评估、生态系统服务与人类福祉的关系已取得较多研究成果,但关于生态系统服务供给与人类需求空间关系的研究成果相对较少;本文综合考虑土地利用开发程度、人口密度和地均 GDP 三方面因素定量表征生态需求,基于象限图划分生态系统服务供需分区,是对生态系统服务供需定量分析的重要尝试。但是,如何精确度量特定生态系统服务的现实需求仍有待进一步深入探讨,尤其需要高度关注生态系统服务供给、需求的内涵一致性。此外,尺度问题是宏观生态学的核心问题之一,生态网络的构建和优化也应在不同尺度上进行,多尺度生态网络既自成体系又相互连通[34]。本研究旨在从省域尺度提出广东省生态系统服务供给与需求分区的管制方案,进一步研究有必要基于更高精度的空间化指标,在县市尺度上综合评估绿地生态网络构建的适宜性、绿色基础设施开发阻力、景观连通重要性及其局地生态效应,在生态系统服务供需均衡的导向下引入空间计量模型,识别绿地生态网络构建的优先位置,从而在分区构建网络的基础上,高效完成绿地生态网络的具体建设布局。

参考文献(References):

[1] 张庆费. 城市绿色网络及其构建框架. 城市规划汇刊, 2002, (1): 75-76, 78-78.
[2] Kong F H, Yin H W, Nakagoshi N, Zong Y G. Urban green space network development for biodiversity conservation: identification based on graph theory and gravity modeling. Landscape and Urban Planning, 2010, 95(1/2): 16-27.
[3] Zhou X L, Wang Y C. Spatial-temporal dynamics of urban green space in response to rapid urbanization and greening policies. Landscape and Urban Planning, 2011, 100(3): 268-277.
[4] 彭建, 汪安, 刘焱序, 马晶, 吴健生. 城市生态用地需求测算研究进展与展望. 地理学报, 2015, 70(2): 333-346.
[5] Dumenu W K. What are we missing? Economic value of an urban forest in Ghana. Ecosystem Services, 2013, 5: 137-142.
[6] Sandifer P A, Sutton-Grier A E, Ward B P. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: opportunities to enhance health and biodiversity conservation. Ecosystem Services, 2015, 12: 1-15.
[7] 周媛, 石铁矛, 胡远满, 高畅, 刘淼. 沈阳城市绿地适宜性与空间布局. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1805-1812.
[8] Linehan J, Gross M, Finn J. Greenway planning: developing a landscape ecological network approach. Landscape and Urban Planning, 1995, 33(1/3): 179-193.
[9] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. Landscape and Urban Planning, 2002, 58(2/4): 269-280.
[10] Conine A, Xiang W N, Young J, Whitley D. Planning for multi-purpose greenways in Concord, North Carolina. Landscape and Urban Planning, 2004, 68(2/3): 271-287.
[11] Toccolini A, Fumagalli N, Senes G. Greenways planning in Italy: the Lambro River Valley Greenways System. Landscape and Urban Planning, 2006, 76(1/4): 98-111.

[12] 鲁敏, 杨东兴, 刘佳, 裴翡翡. 济南绿地生态网络体系的规划布局与构建. 中国生态农业学报, 2010, 18(3): 600-605.

[13] 许文雯, 孙翔, 朱晓东, 宗跃光, 李杨帆. 基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别. 生态学报, 2012, 32(4): 1264-1272.

[14] 吴榛, 王浩. 扬州市绿地生态网络构建与优化. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1976-1985.

[15] 张蕾, 苏里, 汪景宽, 程铭. 基于景观生态学的鞍山市生态网络构建. 生态学杂志, 2014, 33(5): 1337-1343.

[16] 陈春娣, Colin M D, Maria I E, Glenn S H, 吴胜军. 城市生态网络功能性连接辨识方法. 生态学报, 2015, 35(19): 6414-6424.

[17] 许峰, 尹海伟, 孔繁花, 徐建刚. 基于 MSPA 与最小路径方法的巴中西部新城生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(19): 6425-6434.

[18] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. 生态学报, 2008, 28(4): 1711-1719.

[19] 郭微, 俞龙生, 孙延军, 陈平. 佛山市顺德中心城区城市绿地生态网络规划. 生态学杂志, 2012, 31(4): 1022-1027.

[20] 陈剑阳, 尹海伟, 孔繁花, 幺贵鹏. 环太湖复合型生态网络构建. 生态学报, 2015, 35(9): 3113-3123.

[21] 尹海伟, 孔繁花, 祈毅, 王红扬, 周艳妮, 秦正茂. 湖南省城市群生态网络构建与优化. 生态学报, 2011, 31(10): 2863-2874.

[22] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, Van Den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.

[23] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.

[24] 张彪, 谢高地, 肖玉, 伦飞. 基于人类需求的生态系统服务分类. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(6): 64-67.

[25] Kroll F, Müller F, Haase D, Fohrer N. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics. Land Use Policy, 2012, 29(3): 521-535.

[26] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, Daily G C, Mooney H A, Ehrlich P, Quesada M, Miranda A, Jaramillo V J, García-Oliva F, Martínez-Yrizar A, Cotler H, López-Blanco J, Pérez-Jiménez A, Búrquez A, Tinoco C, Ceballos G, Barraza L, Ayala R, Sarukhán J. Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico. Ecology and Society, 2005, 10(1): 17.

[27] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: mapping ecosystem service flows. Ecosystem Services, 2013, 4: 104-116.

[28] 岳健, 张雪梅. 关于我国土地利用分类问题的讨论. 干旱区地理, 2003, 26(1): 78-88.

[29] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, Müller F. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.

[30] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.

[31] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.

[32] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. Ecological Indicators, 2014, 36: 539-551.

[33] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: a conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery. Ecological Complexity, 2013, 15: 114-121.

[34] 孙逊, 张晓佳, 雷芸, 李雄. 基于城镇绿地生态网络构建的自然景观保护恢复技术与网络规划. 中国园林, 2013, 29(10): 34-39.